

タンクモデル定数の最適化手法の改良

Refinements to Parameter Optimization in the Tank Model

北海道開発局開発土木研究所 渡辺 和好 Kazuyoshi WATANABE

北海道河川防災研究センター 館谷 清 Kiyoshi TATEYA

北海道河川防災研究センター 松本 賢治 Kenji MATSUKI

北海道開発局技術開発室 星 清 Kiyoshi HOSHI

Operational comparisons are presented using the optimization techniques to identify the parameters in Sugawara's Tank model which has been widely employed for long-term runoff analysis. The mathematical optimization techniques tested herein are both the Powell and Newton methods. Computational burden is too stringent in the application of the Powell method to parameter optimization in the Tank model, because a great number of runoff computations are required. The efficiency of optimization performance resulting from use of the Newton method clearly depends on how effectively the sensitivity coefficients can be derived. An important feature of the proposed approach is the theoretical derivation of sensitivity coefficients which can directly be used in the optimization scheme of the Newton method.

A vector differential equation in terms of storages in the four tanks is numerically integrated using the transition matrix which is computed by expanding the matrix exponential. The elements of this transition matrix play a significant role in eliminating additional computations involved in the solution of sensitivity coefficients. On the basis of the simulation results, the Newton method coupled with sensitivity coefficients appears to have potential performance advantages for optimizing the parameters in the Tank model.

Keywords : Sugawara's Tank model, parameter optimization, Newton's method, sensitivity analysis

1. はじめに

流出解析手法として、管原¹⁾の直列4段タンクモデルはモデル構造が簡単で比較的精度が良く、流出過程における物理現象がモデルに反映されているなどの理由から広く用いられている。さらに最近では、このタンクモデルが有効降雨を必要としない点に着目し、洪水時と非洪水時の両期を解析できる長短期流出両用モデルが角屋ら²⁾によって提案されている。しかしながら、これらのモデルはいずれもその同定すべきモデルパラメータ数が16個程度と多いのが、このモデルの実用上の適用にあたっての難点である。

小林ら³⁾と角屋ら⁴⁾は、タンクモデルパラメータの同定手法としての数学的最適化手法について検討を行ない、パウエル法が有効であることを明らかにした。しかしながら、このパウエル法は計算時間が膨大となるため、必ずしも実務向きの手法とは言えない。したがって、本報告では直列4段タンクモデルのモデルパラメータ同定法として感度係数を解析的に算出するこ

とにより計算時間の短縮化と効率性を図るニュートン法の適用性について検討を行うものである。

2. 最適化手法

本報告では図-1に示す直列4段タンクモデルを解析対象とした。同定すべきパラメータは $a_1 \sim a_5$, $b_1 \sim b_3$, $z_1 \sim z_4$ の12個とし、初期貯留量 $S_{10} \sim S_{40}$ は同定対象外とし固定値としている。

(1) 行列演算法による微分方程式の解法⁵⁾

図-1のタンクモデルの各タンクにおける連続式は次のように表わされる。

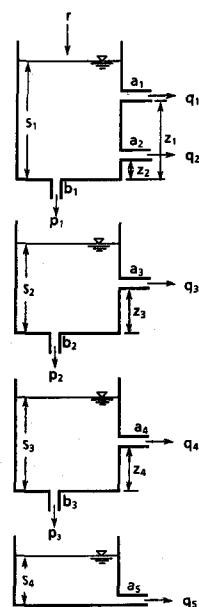


図-1 直列4段タンクモデル

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r - q_1 - q_2 - p_1 \\ \frac{dS_2}{dt} &= p_1 - q_3 - p_2 \\ \frac{dS_3}{dt} &= p_2 - q_4 - p_3 \\ \frac{dS_4}{dt} &= p_3 - q_5 \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $S_1 \sim S_4$: 貯留量、 $q_1 \sim q_5$: 流出量、
 $p_1 \sim p_3$: 浸透量、 r : 降雨量
 流出量および浸透量は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{aligned} q_1 &= a_1(S_1 - z_1) \\ q_2 &= a_2(S_1 - z_2) \\ q_3 &= a_3(S_2 - z_3) \\ q_4 &= a_4(S_3 - z_4) \\ q_5 &= a_5 S_4 \\ p_1 &= b_1 S_1 \\ p_2 &= b_2 S_2 \\ p_3 &= b_3 S_3 \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots(2)$$

(1)式の連続式に(2)式を代入して整理すると次式が得られる。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= -(a_1 + a_2 + b_1) S_1 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + r \\ \frac{dS_2}{dt} &= b_1 S_1 - (a_3 + b_2) S_2 + a_3 z_3 \\ \frac{dS_3}{dt} &= b_2 S_2 - (a_4 + b_3) S_3 + a_4 z_4 \\ \frac{dS_4}{dt} &= b_3 S_3 - a_5 S_4 \end{aligned} \right. \quad \dots\dots\dots(3)$$

この連立微分方程式をマトリックス表示すると(4)式になる。

$$\frac{dS}{dt} = AS + B \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} a_1 z_1 + a_2 z_2 + r \\ a_3 z_3 \\ a_4 z_4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -(a_1 + a_2 + b_1) & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & -(a_3 + b_2) & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & -(a_4 + b_3) & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & -a_5 \end{bmatrix}$$

(4)式は線形微分方程式であり、次のように差分方程式に変換することができる。

$$S_{k+1} = \Phi S_k + \Gamma B_k \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 Φ と Γ は共に (4×4) の定係数行列であり、次式で計算される。

$$\Phi = e^{AT} = I + AT + \frac{1}{2} A^2 T^2 + \frac{1}{6} A^3 T^3 + \dots\dots\dots(6)$$

$$\Gamma = (e^{AT} - I) = T \left[I + \frac{1}{2} AT + \frac{1}{6} A^2 T^2 + \frac{1}{24} A^3 T^3 + \dots\dots \right] \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 T は計算時間間隔、 I は (4×4) の単位行列

(6), (7)式の級数和を何項までとれば、実用上十分な計算精度が得られるかの検討を行い、本報告では項数を5項までとした。

行列 A を(6), (7)式に代入し整理すると、(5)式は次式に書換えられる。

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & 0 & 0 \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} & 0 \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \phi_{43} & \phi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & 0 & 0 \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} & 0 \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} & \gamma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 z_1 + a_2 z_2 + r \\ a_3 z_3 \\ a_4 z_4 \\ 0 \end{bmatrix}_k \quad \dots\dots\dots(8)$$

(8)式の行列 Φ, Γ は下三角行列となっており、下段タンクの定数は上段タンクの貯留量に影響を及ぼさないことがわかる。

また、(8)式は $S_1 - z_1 > 0, S_1 - z_2 > 0, S_2 - z_3 > 0, S_3 - z_4 > 0$ の場合、つまり各タンクにおいて貯留量が各流出孔高よりも上にある状態での解であるが、それぞれが負のとき、つまりあるタンクにおいて貯留量が流出孔高を下まわった状態では流出量 q_i は0としてやらなければならない。したがって、貯留量の状態による場合分けが必要となる。貯留量と流出孔高の大小関係は、1段タンクが $(S_1 > z_1, z_1 > S_1 > z_2, z_2 > S_1)$ の3ケース、2段タンクが $(S_2 > z_3, z_3 > S_2)$ 、3段タンクが $(S_3 > z_4, z_4 > S_3)$ の各2ケース合せて $3 \times 2 \times 2 = 12$ 通りであり、各状態に対応す

る12通りの行列 A , B すなわち Φ , Γ が必要となる。
 しかしながら、行列 Φ と Γ は定係数行列であるので、
 あらかじめ設定でき、計算も容易に行える。たとえば、
 1 段タンクが $z_1 > S_1 > z_2$ 、3 段タンクが $z_4 > S_3$ の
 状態であるとき、(1) 式は

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = r - q_2 - p_1 \\ \frac{dS_2}{dt} = p_1 - q_3 - p_2 \\ \frac{dS_3}{dt} = p_2 - p_3 \\ \frac{dS_4}{dt} = p_3 - q_3 \end{cases} \dots\dots\dots (1')$$

となり、(2) 式においては $q_1 = 0$, $q_4 = 0$ となる。
 このときの (2) 式を (1)' 式に代入して整理したものを
 マトリックス表示すると次式が得られる。

$$\frac{dS}{dt} = A'S + B'$$

ここで、

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} \quad B' = \begin{bmatrix} a_2 z_2 + r \\ a_3 z_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} -(a_2 + b_1) & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & -(a_3 + b_2) & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & -b_3 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & -a_5 \end{bmatrix}$$

この A' , B' を用いて Φ , Γ を計算する。同様に各
 タンクにおける貯留量の状態を計算ステップ毎に判断
 し、対応する Φ , Γ を用いて (8) 式によりタンクモデル
 の貯留量を求め、求めた貯留量を (2) 式に代入して流
 出量を求める。

(2) モデルパラメータの最適化⁶⁾

ニュートン法によるパラメータ最適同定では感度係
 数の算定が鍵となる。以下に感度係数を解析的に求め
 る方法を述べる。たとえば、(3) 式の第 1 式を各パラメ
 ータで微分すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_1} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_1} \right) \\ &= -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - S_1 + z_1 \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_2} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_2} \\ &\quad - S_1 + z_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_3} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_3} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_3} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_4} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_4} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_4} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_5} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial a_5} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial a_5} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b_1} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_1} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_1} - S_1 \\ \frac{\partial}{\partial b_2} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_2} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_2} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b_3} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial b_3} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial b_3} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z_1} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial z_1} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial z_1} + a_1 \\ \frac{\partial}{\partial z_2} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial z_2} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial z_2} + a_2 \\ \frac{\partial}{\partial z_3} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial z_3} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial z_3} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z_4} \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S_1}{\partial z_4} \right) = -(a_1 + a_2 + b_1) \frac{\partial S_1}{\partial z_4} = 0 \end{aligned}$$

上式の算定にあたっては、モデル定数は時間的に変
 化しないとしている。また、前述したように、下段タ
 ンクの定数が上段タンクの貯留量に影響を及ぼさない
 条件により、感度係数がゼロとなる項が現われる。

以下同様に (3) 式を $a_1 \sim a_5$, $b_1 \sim b_3$, $z_1 \sim z_4$ で微分
 すると、次の感度係数微分方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a_1 + a_2 + b_1)I & 0 & 0 & 0 \\ b_1 I & -(a_3 + b_2)I & 0 & 0 \\ 0 & b_2 I & -(a_4 + b_3)I & 0 \\ 0 & 0 & b_3 I & -a_5 I \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$u_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_1}{\partial a_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial S_1}{\partial z_4} \end{bmatrix} \quad u_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_2}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_2}{\partial a_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial S_2}{\partial z_4} \end{bmatrix}$$

$$u_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_3}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_3}{\partial a_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial S_3}{\partial z_4} \end{bmatrix} \quad u_4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_4}{\partial a_1} \\ \frac{\partial S_4}{\partial a_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial S_4}{\partial z_4} \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} -S_1 + z_1 \\ -S_1 + z_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_1 \\ 0 \\ 0 \\ a_1 \\ a_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -S_2 + z_3 \\ 0 \\ 0 \\ S_1 \\ -S_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_3 + z_4 \\ 0 \\ 0 \\ S_2 \\ -S_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad D_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_4 \\ 0 \\ 0 \\ S_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$u_i (i = 1, 2, 3, 4)$ は (12×1) 行列、 I は (12×12) の単位行列である。

(9) 式は、次のように差分方程式に変換される。

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \phi_{11}I & 0 & 0 & 0 \\ \phi_{21}I & \phi_{22}I & 0 & 0 \\ \phi_{31}I & \phi_{32}I & \phi_{33}I & 0 \\ \phi_{41}I & \phi_{42}I & \phi_{43}I & \phi_{44}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \gamma_{11}I & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{21}I & \gamma_{22}I & 0 & 0 \\ \gamma_{31}I & \gamma_{32}I & \gamma_{33}I & 0 \\ \gamma_{41}I & \gamma_{42}I & \gamma_{43}I & \gamma_{44}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix}_k \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで注目すべき点は ϕ_{ij} 、 γ_{ij} は前節で求めた(8)式の行列 Φ 、 Γ の要素 ϕ_{ij} 、 γ_{ij} と同一であることである。

すなわち、 ϕ_{ij} 、 γ_{ij} は一度求めてしまえば再度求める必要がなく、このことにより計算時間の短縮と効率化が図られることになる。

さらに、前述の流出計算と同様に、貯留量と流出孔高の大小関係の条件に対応した ϕ_{ij} 、 γ_{ij} を用いればよい。

(10) 式の解は貯留量 ($S_1 \sim S_4$) に関する 12 個の各パラメータの感度係数になる。流出量 ($q_1 \sim q_4$) と貯留量 ($S_1 \sim S_4$) の関係は(2)式で定義されるので、流出量に関する各パラメータの感度係数は(10)式の解から容易に算定される。

全流量は次式の流出成分の和で与えられる。

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad \dots\dots\dots(11)$$

したがって、流量 q に関する感度係数は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial a_1} &= \frac{\partial q_1}{\partial a_1} + \frac{\partial q_2}{\partial a_1} + \frac{\partial q_3}{\partial a_1} + \frac{\partial q_4}{\partial a_1} + \frac{\partial q_5}{\partial a_1} \\ &= S_1 + (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial a_1} - z_1 \\ &\quad + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial a_1} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial a_1} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial a_1} \\ \frac{\partial q}{\partial a_2} &= S_1 + (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial a_2} - z_2 \\ &\quad + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial a_2} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial a_2} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial a_2} \\ \frac{\partial q}{\partial a_3} &= S_2 + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial a_3} - z_3 + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial a_3} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial a_3} \\ \frac{\partial q}{\partial a_4} &= S_3 + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial a_4} - z_4 + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial a_4} \\ \frac{\partial q}{\partial a_5} &= S_4 + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial a_5} \quad \dots\dots\dots(12) \\ \frac{\partial q}{\partial b_1} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial b_1} + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial b_1} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial b_1} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial b_1} \\ \frac{\partial q}{\partial b_2} &= a_3 \frac{\partial S_2}{\partial b_2} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial b_2} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial b_2} \\ \frac{\partial q}{\partial b_3} &= a_4 \frac{\partial S_3}{\partial b_3} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial b_3} \\ \frac{\partial q}{\partial z_1} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial z_1} - a_1 + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial z_1} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial z_1} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial z_1} \\ \frac{\partial q}{\partial z_2} &= (a_1 + a_2) \frac{\partial S_1}{\partial z_2} - a_2 + a_3 \frac{\partial S_2}{\partial z_2} + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial z_2} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial z_2} \\ \frac{\partial q}{\partial z_3} &= a_3 \frac{\partial S_2}{\partial z_3} - a_3 + a_4 \frac{\partial S_3}{\partial z_3} + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial z_3} \\ \frac{\partial q}{\partial z_4} &= a_4 \frac{\partial S_3}{\partial z_4} - a_4 + a_5 \frac{\partial S_4}{\partial z_4} \end{aligned}$$

なお、(12)式の感度係数算定にあたっては、下段にあるタンク定数は上段の流出量に影響を及ぼさない点を念頭に入れておく必要がある。

(12)式の感度係数は、ニュートン法による最適化手法に直接組込むことができ、定数補正量が容易に算出されることになる。なお、最適モデル定数を求めるための目的関数としては、次の誤差評価基準を用いる。

$$\text{Min } J = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{(q_j^* - q_j)^2}{q_j^*} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 q_j^* と q_j はそれぞれ、サンプリング時刻 j における観測流量と計算流量であり、 N は標本数である。

実際の計算にあたっては、以下の点を考慮した。

- (i) タンクモデル定数のオーダーが極端に異なると最適化が効率良く行えない。このため、定数のオーダーを揃えるために定数をそれぞれの初期値で基準化する(基準化ニュートン法)。
- (ii) 感度係数が高い相関をもつ場合、探索が発散する方向に進む懸念がある。その影響をおさえるために感度係数行列の直交変換を用いる(成分回帰分析手法⁷⁾)。

3. 模擬発生データによる同定計算

北海道開発局で調査を行っている北広島流出試験地(流域面積 24 km²)における実測日降雨データを用いて、提案手法の妥当性を検討した。まず、図-2に示すようにモデル定数の真値を仮定し、流出計算を行った。

解析対象に用いたハイレートグラフとハイドログラフを図-3に示す。次に、モデル定数の初期値として真値に±10%と±20%の誤差を与えた値を設定し、真値を同定するか否かをニュートン法を用いて検討した。とくに、本報告で述べたニュートン法では流出計算と感度係数計算が同時に行える点が大きな特徴と言える。また基準化パウエル法(以下単にパウエル法と呼ぶ)を用いた同定計算も併せて行い、ニュートン法との比較を行った。パウエル法は、非線形関

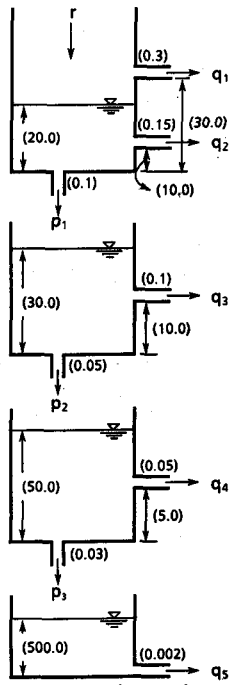


図-2 設定した真値

数の最小化問題に対応できる最適化手法の一つで数回の共役方向の最小点の探索によって同定する方法である。日降雨データは昭和 61 年 5 月から 10 月までの 6 ヶ月間を用い、184 日分のデータとした。計算のステップは 1 日を 5 分割 ($T = 0.2$) し、また蒸発散は考慮しなかった。

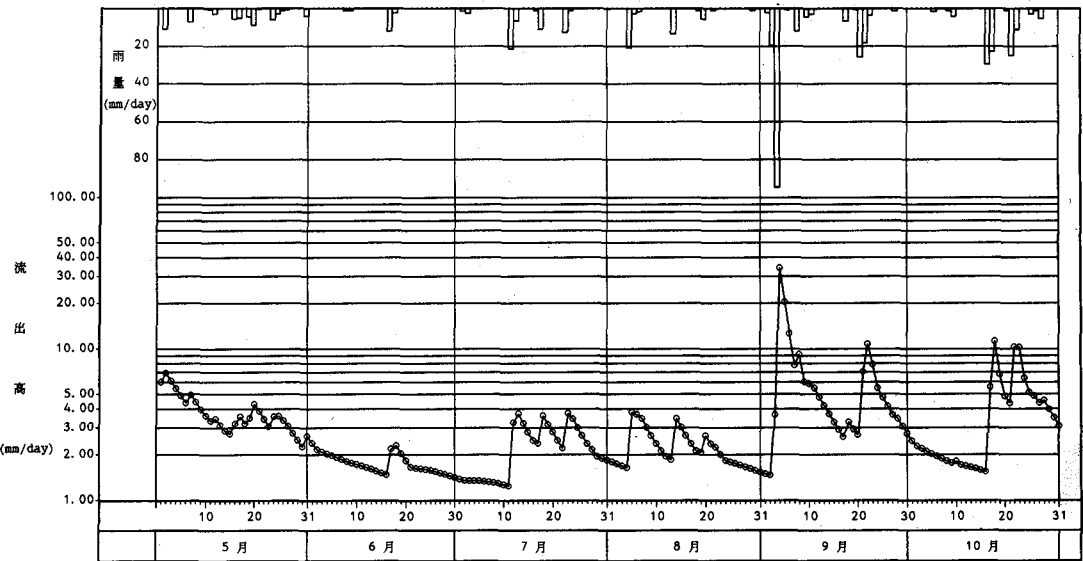


図-3 計算に用いた流出高

表-1 最 適 同 定 結 果

検 討 例	真値からの差	① ニュートン法		② パウエル法		同定時間比 (②/①)
		計算回数	同定時間	計算回数	同定時間	
Case 1	+10%	11	47 秒	2,616	14 分 20 秒	18.3
Case 2	-10%	16	1 分 10 秒	1,976	10 分 51 秒	9.3
Case 3	+20%	11	47 秒	5,017	27 分 15 秒	34.8
Case 4	-20%	14	59 秒	2,672	14 分 39 秒	14.9
Case 5	±10% 混在	11	47 秒	3,592	19 分 42 秒	25.1
Case 6	±10% 混在	10	43 秒	2,166	11 分 51 秒	16.5
Case 7	±20% 混在	11	47 秒	4,936	26 分 44 秒	34.1
Case 8	±20% 混在	17	1 分 12 秒	2,995	16 分 23 秒	13.7

計算機はSUN 3/260(4mips)を用いた。計算結果を表-1に示す。表-1に示したニュートン法における計算回数は、流出計算と感度係数の計算を1回とし、パウエル法では流出計算を1回としており、ニュートン法とパウエル法では、流出計算回数に 10^2 倍程度の差がある。何れの方法においても8ケース全て仮定した真値を同定した。計算時間に関しては、ニュートン法が1分程度であるのに対しパウエル法では10分以上かかっている。表-1に示される同定時間比をみるとパウエル法はニュートン法の10倍以上であり、パソコン程度の機種で解析する場合、パウエル法では時間がかりすぎると考えられる。

4. おわりに

タンクモデルパラメータの同定手法として感度係数を用いたニュートン法について、模擬発生データを用いて同定計算を行い、適用性の検討を行った。その結果、今回の検討結果では、感度係数を用いたニュートン法はタンクモデルパラメータの同定手法として有効であり、パウエル法との計算時間比較から、より実務的手法であると考えられる。

しかしながら、タンクモデルパラメータの初期貯留

量および蒸発散を考慮していないため、実用化に際しては、(i)初期貯留量を含む、16個のパラメータ同定、(ii)蒸発散を考慮した計算が今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972.
- 2) 角屋睦：長短期流出両用モデルの開発とダム管理への活用に関する研究，昭和62年度科学研究費補助金一般研究(B)，研究成果報告書，1988年，3月.
- 3) 小林慎太郎・丸山利輔：Powellの共役方向法によるタンクモデル定数の探索，農業土木学会論文集第65号，1976年，10月.
- 4) 角屋睦・永井明博：流出解析手法(その12)ータンクモデルとSP法による最適同定ー，農業土木学会誌第48巻第12号，1980年，12月.
- 5) 星 清：やさしい微分方程式の数値解法，土木試験所月報NO. 395，1986年，4月.
- 6) 星 清：やさしい数学的最適化手法，土木試験所月報NO. 398，1986年，7月.
- 7) 星 清：成分回帰分析手法，土木試験所月報NO. 397，1986年，6月.